(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT

(12) **Offenlegungsschrift**

(10) **DE 196 41 754 A 1**

(51) Int. Cl.[6]:
G 06 E 3/00
G 07 C 15/00

(21) Aktenzeichen: 196 41 754.6
(22) Anmeldetag: 10. 10. 96
(43) Offenlegungstag: 16. 4. 98

DE 196 41 754 A 1

(71) Anmelder:
Deutsche Telekom AG, 53113 Bonn, DE

(72) Erfinder:
Dultz, Wolfgang, Dr.phil.nat., 65936 Frankfurt, DE;
Hildebrandt, Eric, 60487 Frankfurt, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:

US 48 33 633
RARITY, J.G., OWENS, C.M., u.a.: Quantum random-
number generation and key sharing. In: Journal of Modern Optics, 1994, Vol. 41, No. 12, S.2435-S.2444;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Optischer Zufallsgenerator basierend auf der Einzelphotonenstatistik am optischen Strahlteiler

(57) Damit ein Zufallsgenerator zur Erzeugung einer Zufallszahl, welche vorzugsweise in Binärdarstellung erhalten wird, mit einer Teilchenquelle, einem auf von der Teilchenquelle emittierte Teilchen einwirkenden zufallsgenerierenden Element, und einer Erfassungseinrichtung, die der Detektion eines aus dem zufallsgenerierenden Element austretenden Teilchens einen Zahlenwert, vorzugsweise in Binärdarstellung, zuordnet, gegenüber externen Störungen unanfällig ist und Zufallszahlen hoher Qualität liefert, ist vorgesehen, daß die Teilchenquelle zumindest zwei Teilchen im wesentlichen gleichzeitig emittieren kann und ein Teilchen die Erfassungseinrichtung aktivieren kann, um ein weiteres, durch das zufallsgenerierende Element beeinflußte Teilchen zu erfassen und um diesem einen Zahlenwert zuzuordnen.

DE 196 41 754 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Zufallsgenerator gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Der Erzeugung von Zufallszahlen kommt heute mehr Bedeutung denn je zu. Nicht nur auf elektronischen Checkkarten, in intelligenten Schließsystemen oder beim On-Line-Zugriff auf Datenbanken spielt die Qualität von Zufallszahlen eine erhebliche, wenn nicht sogar eine Schlüsselrolle. Neben der Menge an benötigten Zufallszahlen, die ständig zunimmt, muß auch sichergestellt sein, daß von außen zugängliche Korrelationen oder Möglichkeiten der Entschlüsselung auf ein Mindestmaß reduziert sind.

Zur Erzeugung von Zufallszahlen wurden bisher im wesentlichen zwei verschiedenartige Klassen von Verfahren angewandt:

1. Algorithmische Verfahren

Bei diesen wird aus einer kurzen Anfangssequenz ("seed") mit Hilfe mathematischer Operationen, die in Soft- oder Hardware ausgeführt werden können, eine wesentlich längere pseudo-zufällige Sequenz erzeugt. Die auf dieser Methode basierenden Zufallsgeneratoren sind von sehr unterschiedlicher Qualität und genügen oft kryptographischen Anforderungen nicht; sie haben dafür allerdings die Eigenschaft, reproduzierbare Zufallszahlen zu liefern, was für Simulationen durchaus nützlich sein kann.

2. Physikalische Verfahren

Bei diesen nutzt man den statistischen Charakter bestimmter physikalischer Prozesse. Generell lassen diese sich weiter unterteilen in:

- Statistische Prozesse die zwar deterministischen Bewegungsgleichungen gehorchen, aber aufgrund hoher Komplexität und der Unkenntnis des Anfangszustandes nicht vorhersagbar sind.
- Fundamental zufällige Prozesse (Elementarprozesse), wie sie von der Quantenmechanik vorhergesagt werden. Sie sind nach dem heutigem Stand der Wissenschaft nicht auf hypothetische deterministische Mechanismen auf Subquantenebene zurückzuführen und daher in ihrer Natur grundsätzlich zufällig.

Bitfolgen, die durch physikalische Prozesse, speziell durch fundamental zufällige, erzeugt werden, kommen dem Konzept einer zufälligen Sequenz näher als algorithmisch generierte Folgen. Schon früh wurde daher erkannt, daß sich z. B. radioaktive Zerfallsmessungen sehr gut eignen, um Zufallssequenzen zu erzeugen, siehe MARTIN GUDE: Ein quasiidealer Gleichverteilungsgenerator basierend auf physikalischen Zufallsphänomenen, Dissertation RWTH Aachen (1987) ; nachteilig ist hierbei allerdings die potentiell schädliche Wirkung radioaktiver Strahlung auf den Menschen und auf empfindliche Elektronik.

Andere Zufallsgeneratoren benutzen physikalische Rauschquellen, wie z. B. Halbleiter-Dioden, um zufällige Bitsequenzen zu erzeugen, siehe beispielsweise MANFRED RICHTER: Ein Rauschgenerator zur Gewinnung von quasiidealen Zufallszahlen für die stochastische Simulation, Dissertation RWTH Aachen (1992). Bei diesen Verfahren ist es allerdings oft schwierig, die Entscheidungsschwelle (zwischen Bitwert 0 und Bitwert 1) exakt und zeitlich unveränderlich einzustellen. Weiterhin ist es für kryptographische Anwendungen sehr wichtig, äußere Einflußnahme auf den Zufallsmechanismus auszuschließen; dies ist gerade bei der Benutzung elektronischer Phänomene nicht leicht zu erreichen.

Der zufällige Prozeß der Wegwahl einzelner Photonen am Strahlteiler wurde bereits zur Erzeugung von Zufallssequenzen vorgeschlagen, siehe J. G. RARITY et al.: Quantum random-number Generation and key sharing, J. Mod. Opt. 41, S. 2435 (1994). Allerdings kann der zufällige Charakter der Ausgangssequenz durch Störimpulse von außen, sowie fehlerhafte Zählungen der Photonendetektoren gestört werden.

Einzelne Photonen teilen sich am optischen Strahlteiler nicht auf, sondern nehmen zufällig und unvorhersehbar einen der beiden möglichen Wege. Photonendetektoren in den Ausgängen des Strahlteilers generieren daher eine Zufallsfolge, deren Qualität auf den grundlegenden Naturgesetzen der Quantenmechanik beruht. Ein Nachteil des Verfahrens besteht jedoch darin, daß Störpulse der Detektoren, die durch äußere Einwirkungen, etwa durch Höhenstrahlen, verursacht werden und nicht vom zufallsgenerierenden Mechanismus am Strahlteiler herrühren, mit in die Zufallsfolge eingehen. Im Prinzip könnte ein Störer durch Bestrahlen des Aufbaus mit elektromagnetischen Strahlen oder Teilchen die Zufallsfolge gezielt verfälschen.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, einen Zufallsgenerator bereitzustellen, der die vorstehenden Nachteile vermeiden oder mindern kann, der gegenüber externen Störungen unanfällig ist und Zufallszahlen hoher Qualität liefert.

Diese Aufgabe wird auf höchst überraschende Weise bereits durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Da die erfindungsgemäße Teilchenquelle zumindest zwei Teilchen im wesentlichen gleichzeitig emittieren kann und dabei ein Teilchen die Erfassungseinrichtung aktiviert, lassen sich hierdurch ungewollte Hintergrundeinflüsse nahezu vollständig vermeiden. Da die Zeit nach dem Aktivieren bzw. Triggern der Erfassungseinrichtung durch das erste Teilchen so kurz bemessen sein kann, daß im wesentlichen nur das zweite, durch das zufallsgenerierende Element gelaufene Teilchen für die Erzeugung der Binärzahl genutzt wird (oder wenn die Erfassungseinrichtung nach dem Detektieren des zweiten Teilchens in den deaktivierten Zustand geschaltet wird,) sind Fehlmessungen nur noch während des sehr kurzen aktivierten bzw. getriggerten Zustands oder durch eine Fehltriggerung möglich. Jedoch selbst in diesen Fällen würden bei der bevorzugten erfindungsgemäßen Ausführung mit einem optischen Strahlteiler mit extrem hoher Wahrscheinlichkeit keine Fehler auftreten, da die einfache Fehltriggerung zu keiner Erfassung eines zweiten Teilchens führen würde oder andernfalls bei korrekter Triggerung in beiden Teilzweigen des Strahlteilers ein Signal erhalten würde, welches auf elektronischem Wege auf einfache Weise korrigierbar ist.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Teilchenquelle eine Photonenpaarquelle zur gleichzeitigen Erzeugung zweier Photonen mit korrelierter Polarisation, Energie und räumlicher Abstrahlungsverteilung umfaßt, denn dann läßt sich durch den vorbekannten Ausbreitungsweg mittels Blenden, durch die bekannte Polarisation mittels eines Polarisators und durch ein spektrales Filter noch vorhandene Hintergrundstrahlung weitestgehend ausblenden.

Die Funktion des zufallsgenerierenden Elements wird weiter verbessert, falls dessen Ausgängen zwei Empfängern zugeordnet sind, die Einzelphotonen detektieren, denn dann kann der klare Einzelphotonennachweis verbleibende Unsicherheiten über das erfaßte Photon beseitigen.

Elektronisch läßt sich der erfindungsgemäße Grundgedanke in der Erfassungseinrichtung mit einer kombinierten Koinzidenz/Antikoinzidenz-Elektronik erfassen.

Restliche Fehler eines Strahlteilers oder von dessen Justierung, wie diese in der Regel immer vorkommen, lassen sich weiter unterdrücken, wenn das zufallsgenerierende Element einen polarisierenden Strahlteiler und vorzugsweise eine vorgeschaltete $\lambda/2$-Verzögerungsplatte zur Abstimmung des Gesamtteilungsverhältnisses enthält.

Bei einer optimal justierten Anordnung von Strahlteiler und $\lambda/2$-Verzögerungsplatte können zukünftige abträgliche Einflüssen in mechanischer Hinsicht dadurch gemildert werden, daß zumindest diese beiden Baugruppen und vorzugsweise die zugeordneten Detektoren in zueinander ausgerichteter Stellung gemeinsam gehalten sind.

In preisgünstiger Ausgestaltung kann das zufallsgenerierende Element einen nicht-polarisierenden Strahlteiler, vorzugsweise eine metallbedampfte Platte und/oder eine dielektrische Schicht, umfassen. Auch bei dieser Ausführungsform können optimale Ergebnisse erzielt werden, wenn zur Abgleichung des optischen Strahlengangs und der Detektionselektronik verstellbare Masken und/oder abstimmbare spektrale Filter in den Ausgängen des Strahlteilers aufgestellt sind.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnungen und unter Bezugnahme auf bevorzugte Ausführungsformen im einzelnen beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1 den grundlegenden Aufbau einer erfindungsgemäßen zufallsgenerierenden Einrichtung,

Fig. 2 eine erste erfindungsgemäße Ausführungsform der einen Laser umfassenden Photonenpaarquelle,

Fig. 3 eine zweite erfindungsgemäße Ausführungsform der einen Laser umfassenden Photonenpaarquelle und

Fig. 4 das zufallsgenerierende Element mit zugeordneten Detektoren.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Prinzipdarstellung von **Fig.** 1 in ihren Grundzügen beschrieben.

Die im Ganzen mit **1** bezeichnete erfindungsgemäße Vorrichtung umfaßt einen Laser als Photonenquelle **3**, ein zufallsgenerierendes Element **2** und eine Koinzidenz- und Symmetrisierelektronik **4**, die über Triggerleitungen **5** aktiviert bzw. getriggert werden kann und dann das Signal der Detektorausgänge **6** empfängt.

Die Erfindung verwendet eine Photonenquelle, bei der jeweils zwei Photonen gleichzeitig in einem nichtlinearen optischen Medium, vorzugsweise einem Kristall **7**, erzeugt werden. Beispiele gut geeigneter optischer, nichtlinearer Kristalle sind BaB_2O_4, $KNbO_3$ oder $LiNbO_3$, die so mit dem Laser **3** gepumpt werden können, daß Paare korrelierter Photonen der doppelten Wellenlänge mit zueinander orthogonaler Polarisation erzeugt werden. Physikalisch wird dieser Effekt auch als parametrische Fluoreszenz vom Typ **2** bezeichnet.

Als Laser **3** wird beispielsweise ein He-Cd-Laser bei einer Betriebswellenlänge von 442 nm eingesetzt, welches Photonen im infraroten Bereich bei 884 nm ergibt. Mit einem als spektralem Filter wirkenden Blauglas **8** wird vor dem Kristall das Plasmaleuchten des Lasers **3** abgeblockt, und ein hinter dem Kristall befindliches spektrales Filter oder Prisma, das in den Figuren nicht dargestellt ist, dient dazu, das Pumplicht des Lasers **3** vom weiteren Strahlengang fernzuhalten. Jedes Photonenpaar wird räumlich aufgeteilt, wobei ein Photon auf einen als zufallsgenerierendes Element wirkenden Strahlteiler **9** fällt, der am besten aus **Fig.** 4 zu erkennen ist und wobei das andere Photon direkt vom Triggerdetektor **10** erfaßt wird.

In einer in den Figuren nicht dargestellten Erfassungseinrichtung, die auch die Koinzidenz- und Symmetrisier-Elektronik **4** enthält, wird dann nur einer der Detektoren **11, 12** ausgelesen, wenn gleichzeitig oder zeitlich zugeordnet der Triggerdetektor **10** ein Signal liefert.

Die Detektoren **10, 11** und **12** können Einzelphotonendetektoren, beispielsweise Si-Avalanche-Photodioden, wie sie von EG ≃ als Typ C30902, geliefert werden, und werden dann vorzugsweise bei –30°C von einem Peltier-Kühler gekühlt betrieben. Eine in den Figuren nicht dargestellte achromatische Linse kann den Lichtstrahl auf den Detektor fokussieren und die empfangene Intensität erhöhen.

Bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren zur Erzeugung von Zufalls-Bitfolgen wird ein fundamentales zufälliges Phänomen benutzt, nämlich die stochastische Aufteilung eines Stromes von Einphotonen-Zuständen am 50 : 50-Strahlteiler mit nachgeschalteter Einzelquanten-Detektion.

Die Korrelation der Zählereignisse der Detektoren **11** und **12** des Strahlteilers **9** mit dem Signal des Triggerdetektors **10** verbessert die Zufallsfolge und schützt vor äußeren Eingriffen in den optischen Strahlengang.

In erfindungsgemäßer Weise können zumindest zwei verschiedene optische Aufbauten verwendet werden, dies ist der in **Fig.** 2 dargestellte kolineare und der in **Fig.** 3 dargestellte nichtkolineare, unter einem Winkel zueinander verlaufende Strahlengänge umfassende Aufbau.

Bei dem nichtkolinearen Aufbau der **Fig.** 3 werden die Photonen bereits bei der Erzeugung im nichtlinearen Kristall **7** dadurch getrennt, daß sie in unterschiedlichen Richtungen propagieren. Die beiden Photonen eines Paares sind nun bereits räumlich getrennt, und ihre Ausbreitungsrichtungen fallen überdies nicht mit der des Lasers zusammen, daher lassen sich gegenüber dem kolinearen Aufbau der **Fig.** 2 optische Komponenten, insbesondere der polarisierende Strahlteiler **13**, sparen, und die optischen Verluste sind entsprechend kleiner.

Bei dem Aufbau der **Fig.** 3 müssen die Photonen eines Paares nicht mehr unterschiedliche Polarisationsrichtungen haben, und es läßt sich folglich auch die parametrische Fluoreszenz vom Typ 1 benutzen, wodurch zusätzliche Flexibilität bei der Optimierung der Photonenrate gewonnen wird, da je nach verwendeter Kristallsorte die Effizienzen der Prozesse vom Typ 1 oder Typ 2 unterschiedlich sein können.

Der Aufbau des zufallsgenerierenden Elements **2** ist in **Fig.** 4 genauer dargestellt. Bei einer ersten erfindungsgemäßen

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Teilchenquelle eine Photonenpaarquelle zur gleichzeitigen Erzeugung zweier Photonen mit korrelierter Polarisation, Energie und räumlicher Abstrahlungsverteilung umfaßt, denn dann läßt sich durch den vorbekannten Ausbreitungsweg mittels Blenden, durch die bekannte Polarisation mittels eines Polarisators und durch ein spektrales Filter noch vorhandene Hintergrundstrahlung weitestgehend ausblenden.

Die Funktion des zufallsgenerierenden Elements wird weiter verbessert, falls dessen Ausgängen zwei Empfängern zugeordnet sind, die Einzelphotonen detektieren, denn dann kann der klare Einzelphotonennachweis verbleibende Unsicherheiten über das erfaßte Photon beseitigen.

Elektronisch läßt sich der erfindungsgemäße Grundgedanke in der Erfassungseinrichtung mit einer kombinierten Koinzidenz/Antikoinzidenz-Elektronik erfassen.

Restliche Fehler eines Strahlteilers oder von dessen Justierung, wie diese in der Regel immer vorkommen, lassen sich weiter unterdrücken, wenn das zufallsgenerierende Element einen polarisierenden Strahlteiler und vorzugsweise eine vorgeschaltete $\lambda/2$-Verzögerungsplatte zur Abstimmung des Gesamtteilungsverhältnisses enthält.

Bei einer optimal justierten Anordnung von Strahlteiler und $\lambda/2$-Verzögerungsplatte können zukünftige abträgliche Einflüssen in mechanischer Hinsicht dadurch gemildert werden, daß zumindest diese beiden Baugruppen und vorzugsweise die zugeordneten Detektoren in zueinander ausgerichteter Stellung gemeinsam gehalten sind.

In preisgünstiger Ausgestaltung kann das zufallsgenerierende Element einen nicht-polarisierenden Strahlteiler, vorzugsweise eine metallbedampfte Platte und/oder eine dielektrische Schicht, umfassen. Auch bei dieser Ausführungsform können optimale Ergebnisse erzielt werden, wenn zur Abgleichung des optischen Strahlengangs und der Detektionselektronik verstellbare Masken und/oder abstimmbare spektrale Filter in den Ausgängen des Strahlteilers aufgestellt sind.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnungen und unter Bezugnahme auf bevorzugte Ausführungsformen im einzelnen beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1 den grundlegenden Aufbau einer erfindungsgemäßen zufallsgenerierenden Einrichtung,

Fig. 2 eine erste erfindungsgemäße Ausführungsform der einen Laser umfassenden Photonenpaarquelle,

Fig. 3 eine zweite erfindungsgemäße Ausführungsform der einen Laser umfassenden Photonenpaarquelle und

Fig. 4 das zufallsgenerierende Element mit zugeordneten Detektoren.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Prinzipdarstellung von **Fig.** 1 in ihren Grundzügen beschrieben.

Die im Ganzen mit **1** bezeichnete erfindungsgemäße Vorrichtung umfaßt einen Laser als Photonenquelle **3**, ein zufallsgenerierendes Element **2** und eine Koinzidenz- und Symmetrisierelektronik **4**, die über Triggerleitungen **5** aktiviert bzw. getriggert werden kann und dann das Signal der Detektorausgänge **6** empfängt.

Die Erfindung verwendet eine Photonenquelle, bei der jeweils zwei Photonen gleichzeitig in einem nichtlinearen optischen Medium, vorzugsweise einem Kristall **7**, erzeugt werden. Beispiele gut geeigneter optischer, nichtlinearer Kristalle sind BaB_2O_4, $KNbO_3$ oder $LiNbO_3$, die so mit dem Laser **3** gepumpt werden können, daß Paare korrelierter Photonen der doppelten Wellenlänge mit zueinander orthogonaler Polarisation erzeugt werden. Physikalisch wird dieser Effekt auch als parametrische Fluoreszenz vom Typ **2** bezeichnet.

Als Laser **3** wird beispielsweise ein He-Cd-Laser bei einer Betriebswellenlänge von 442 nm eingesetzt, welches Photonen im infraroten Bereich bei 884 nm ergibt. Mit einem als spektralem Filter wirkenden Blauglas **8** wird vor dem Kristall das Plasmaleuchten des Lasers **3** abgeblockt, und ein hinter dem Kristall befindliches spektrales Filter oder Prisma, das in den Figuren nicht dargestellt ist, dient dazu, das Pumplicht des Lasers **3** vom weiteren Strahlengang fernzuhalten. Jedes Photonenpaar wird räumlich aufgeteilt, wobei ein Photon auf einen als zufallsgenerierendes Element wirkenden Strahlteiler **9** fällt, der am besten aus **Fig.** 4 zu erkennen ist und wobei das andere Photon direkt vom Triggerdetektor **10** erfaßt wird.

In einer in den Figuren nicht dargestellten Erfassungseinrichtung, die auch die Koinzidenz- und Symmetrisier-Elektronik **4** enthält, wird dann nur einer der Detektoren **11, 12** ausgelesen, wenn gleichzeitig oder zeitlich zugeordnet der Triggerdetektor **10** ein Signal liefert.

Die Detektoren **10, 11** und **12** können Einzelphotonendetektoren, beispielsweise Si-Avalanche-Photodioden, wie sie von EG≃ als Typ C30902, geliefert werden, und werden dann vorzugsweise bei −30°C von einem Peltier-Kühler gekühlt betrieben. Eine in den Figuren nicht dargestellte achromatische Linse kann den Lichtstrahl auf den Detektor fokussieren und die empfangene Intensität erhöhen.

Bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren zur Erzeugung von Zufalls-Bitfolgen wird ein fundamentales zufälliges Phänomen benutzt, nämlich die stochastische Aufteilung eines Stromes von Einphotonen-Zuständen am 50 : 50-Strahlteiler mit nachgeschalteter Einzelquanten-Detektion.

Die Korrelation der Zählereignisse der Detektoren **11** und **12** des Strahlteilers **9** mit dem Signal des Triggerdetektors **10** verbessert die Zufallsfolge und schützt vor äußeren Eingriffen in den optischen Strahlengang.

In erfindungsgemäßer Weise können zumindest zwei verschiedene optische Aufbauten verwendet werden, dies ist der in **Fig.** 2 dargestellte kolineare und der in **Fig.** 3 dargestellte nichtkolineare, unter einem Winkel zueinander verlaufende Strahlengänge umfassende Aufbau.

Bei dem nichtkolinearen Aufbau der **Fig.** 3 werden die Photonen bereits bei der Erzeugung im nichtlinearen Kristall **7** dadurch getrennt, daß sie in unterschiedlichen Richtungen propagieren. Die beiden Photonen eines Paares sind nun bereits räumlich getrennt, und ihre Ausbreitungsrichtungen fallen überdies nicht mit der des Lasers zusammen, daher lassen sich gegenüber dem kolinearen Aufbau der **Fig.** 2 optische Komponenten, insbesondere der polarisierende Strahlteiler **13**, sparen, und die optischen Verluste sind entsprechend kleiner.

Bei dem Aufbau der **Fig.** 3 müssen die Photonen eines Paares nicht mehr unterschiedliche Polarisationsrichtungen haben, und es läßt sich folglich auch die parametrische Fluoreszenz vom Typ 1 benutzen, wodurch zusätzliche Flexibilität bei der Optimierung der Photonenrate gewonnen wird, da je nach verwendeter Kristallsorte die Effizienzen der Prozesse vom Typ 1 oder Typ 2 unterschiedlich sein können.

Der Aufbau des zufallsgenerierenden Elements **2** ist in **Fig.** 4 genauer dargestellt. Bei einer ersten erfindungsgemäßen

Ausführungsform umfaßt das zufallsgenerierende Element einen polarisierenden 50 : 50-Strahlteiler **9** mit Einzelphotonendetektoren **11**, **12** in dessen Ausgängen und mit einer optionalen computergesteuerten drehbaren λ/2-Verzögerungsplatte im Eingang. Durch Drehen dieser λ/2-Platte läßt sich das Gesamtteilungsverhältnis, das aufgrund der Bauteiltoleranzen bei den Detektoren im allgemeinen von 50 : 50 abweichen würde auf besser als 0,1% Abweichung vom Idealwert einstellen.

Die Eingangsseite des Strahlteilerwürfels **9** ist durch eine Lochblende bis auf eine Öffnung mit einem Durchmesser Ø = 2 mm abgedeckt; außerdem ist der ungenutzte Eingang des Strahlteilers abgedeckt, und die Strahlengänge zu den Detektoren **11**, **12** sind gegen Hintergrundlicht optisch abgedichtet.

Anstelle des polarisierenden Strahlteilers **9** kann in alternativer erfindungsgemäßer Ausgestaltung auch ein nichtpolarisierender Strahlteiler verwendet werden, der beispielsweise aus einer bedampften planparallelen oder keilförmigen Platte besteht. Diese Bedampfung kann metallisch oder dielektrisch ausgeführt sein. Hierbei auftretende Abweichungen vom 50 : 50-Verhältnis im optischen Aufbau oder der Elektronik lassen sich nach dem Strahlteiler durch Masken oder spektrale Filter ausgleichen.

Eine Erfassungseinrichtung, die an einen PC angeschlossen sein kann und diesem binäre Daten oder in beliebiger anderer Darstellung vorliegende Daten zuführen kann, umfaßt die Koinzidenz- und Symmetrisierelektronik **4**, welcher die Ausgangssignale der Detektoren **11** und **12** sowie des Triggerdetektors **10** zugeführt sind. Im einfachsten Fall wird hierfür ein UND-Gatter mit einem Zeit-Delay in einem der Eingänge verwendet. Die Ausgangssignale der beiden Koinzidenzeinheiten generieren vorläufige Bitwerte "1" bzw. "0".

Um eine weitere Einschränkung der Einflüsse von Falschlicht und Detektordunkelzählraten zu erreichen, wird aus den Ausgangssignalen der Koinzidenzeinheiten mittels eines EXOR-Gatters ein "Event"-Signal erzeugt, das nur dann auf "HIGH"-Level ist, wenn eine Koinzidenz des Trigger-Detektors **10** mit genau einem der beiden Ausgangsdetektoren **11**, **12** vorliegt.

Um eine vollständig uniforme "0–1"-Folge zu erzeugen, wird das Ausgangssignal noch mit einer Hardware-Version des "von Neumann-Algorithmus", s. beispielsweise J. von Neumann "Various Techniques Used in Connection with Random Digits", Appl. Math. Ser., 12, Seiten 36–38 (1951), symmetrisiert. Bei diesem Algorithmus wird die Ursprungssequenz zunächst in nichtüberlappende Paare aufeinanderfolgender Bits aufgeteilt und aus diesen Paaren anschließend die Ausgangssequenz nach folgender Vorschrift generiert:

Bit 1	Bit 2	Ausgangs-Bit
1	1	-
1	0	1
0	1	0
0	0	-

Dieses Verfahren hat zwar den Nachteil einer mindestens 75%igen Reduktion der maximal erreichbaren Bitrate, garantiert jedoch dafür eine exakte 50 : 50-Verteilung der "0"-en und "1"-en, ohne unerwünschte Korrelationen einzubeziehen, was sich bei anderen Verfahren, die niedrigere Bitrateneinbußen haben, nur schwer ausschließen läßt.

Die auf diese Weise erhaltenen Werte werden in einem Pufferspeicher zwischengespeichert und anschließend von einem Steuerrechner oder einem PC übernommen.

Um eine vorgenommene Justierung stabil aufrechtzuerhalten, kann die erfindungsgemäße Vorrichtung und deren optische und optoelektronische Elemente auf einem eigenen Träger, wie beispielsweise einer zweidimensionalen optischen Bank oder einem mechanisch bearbeiteten Block aus Metall oder Keramik, aufgebaut sein. Darüber hinaus liegt es im Rahmen der Erfindung, sobald Laser in Miniaturgröße mit geeigneten Spektren zur Verfügung stehen, den Zufallsgenerator in integriert-optoelektronischer Ausführungsform zu realisieren.

Patentansprüche

1. Zufallsgenerator zur Erzeugung einer Zufallszahl, welche vorzugsweise in Binärdarstellung erhalten wird, umfassend eine
   - Teilchenquelle,
   - ein auf von der Teilchenquelle emittierte Teilchen einwirkendes zufallsgenerierendes Element, und
   - eine Erfassungseinrichtung, die der Detektion eines aus dem zufallsgenerierenden Element austretenden Teilchens einen Zahlenwert, vorzugsweise in Binärdarstellung, zuordnet,**dadurch gekennzeichnet**, daß die Teilchenquelle zumindest zwei Teilchen im wesentlichen gleichzeitig emittieren kann und ein Teilchen die Erfassungseinrichtung aktivieren kann, um ein weiteres, durch das zufallsgenerierende Element beeinflußte Teilchen zu erfassen und um diesem einen Zahlenwert zuzuordnen.

2. Zufallsgenerator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilchenquelle eine Photonenpaarquelle zur gleichzeitigen Erzeugung zweier Photonen mit korrelierter Polarisation, Energie und räumlicher Abstrahlverteilung umfaßt.

3. Zufallsgenerator nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das zufallsgenerierende Element einen Strahlteiler umfaßt, dessen Ausgänge zwei Empfängern, die Einzelphotonen detektieren, zugeordnet sind.

4. Zufallsgenerator nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassungseinrichtung einen Einzelphotonen-Empfänger zur Detektierung des aktivierenden Triggerphotons des Photonenpaars verwendet.

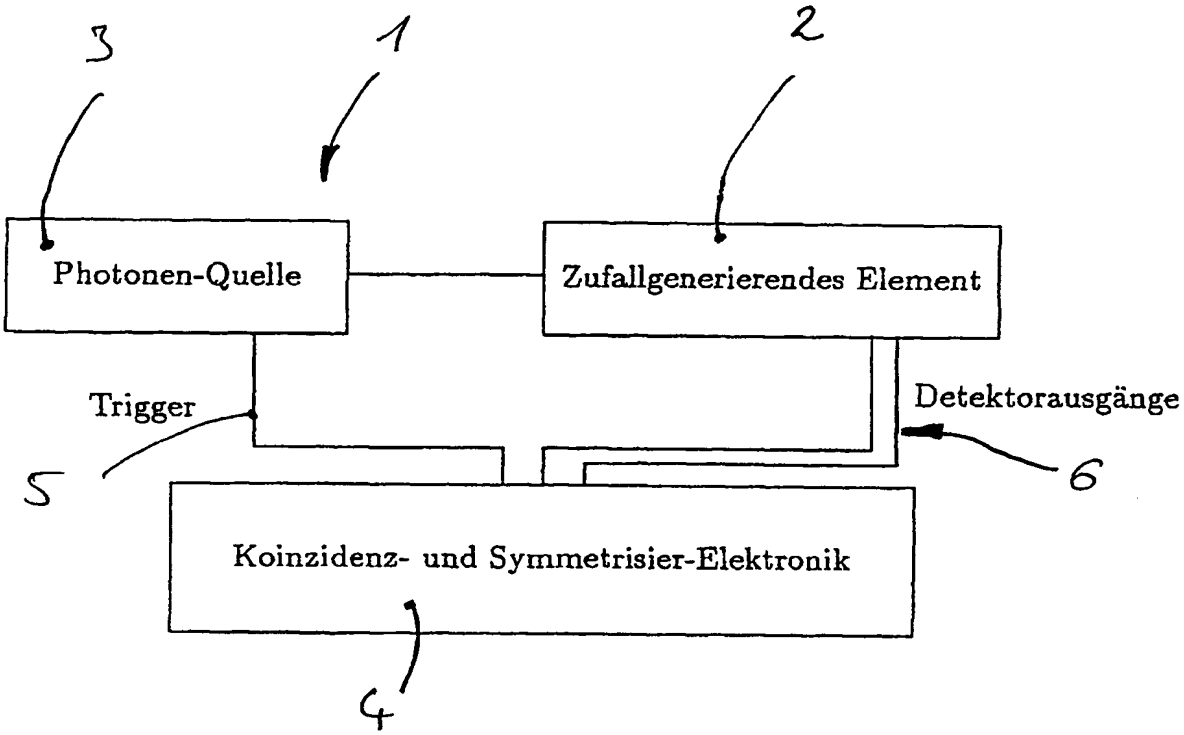
5. Zufallsgenerator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassungseinrichtung eine kombinierte Koinzidenz/Antikoinzidenz-Elektronik umfaßt.
6. Zufallsgenerator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das zufallsgenerierende Element einen polarisierenden Strahlteiler und vorzugsweise eine vorgeschaltete λ/2-Verzögerungsplatte zur Abstimmung des Gesamtteilungsverhältnisses enthält
7. Zufallsgenerator nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der polarisierende Strahlteiler und die λ/2-Verzögerungsplatte in zueinander ausgerichteter Stellung gemeinsam gehalten sind.
8. Zufallsgenerator nach einem der vorstehenden Ansprüche von 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das zufallsgenerierende Element einen nicht-polarisierenden Strahlteiler, vorzugsweise eine metallbedampfte Platte und/oder eine dielektrische Schicht, umfaßt.
9. Zufallsgenerator nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Abgleichung des optischen Strahlengangs und der Detektionselektronik verstellbare Masken und/oder abstimmbare spektrale Filter in den Ausgängen des Strahlteilers aufgestellt sind.
10. Zufallsgenerator nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Gesamteilungsverhältnis zwischen den einzelnen Ausgängen des zufallsgenerierenden Elementes durch optische und/oder elektronische Einrichtungen auf ein etwa gleiches Teilungsverhältnis, bei Zweiphotonenemission auf etwa 50 : 50, eingestellt ist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

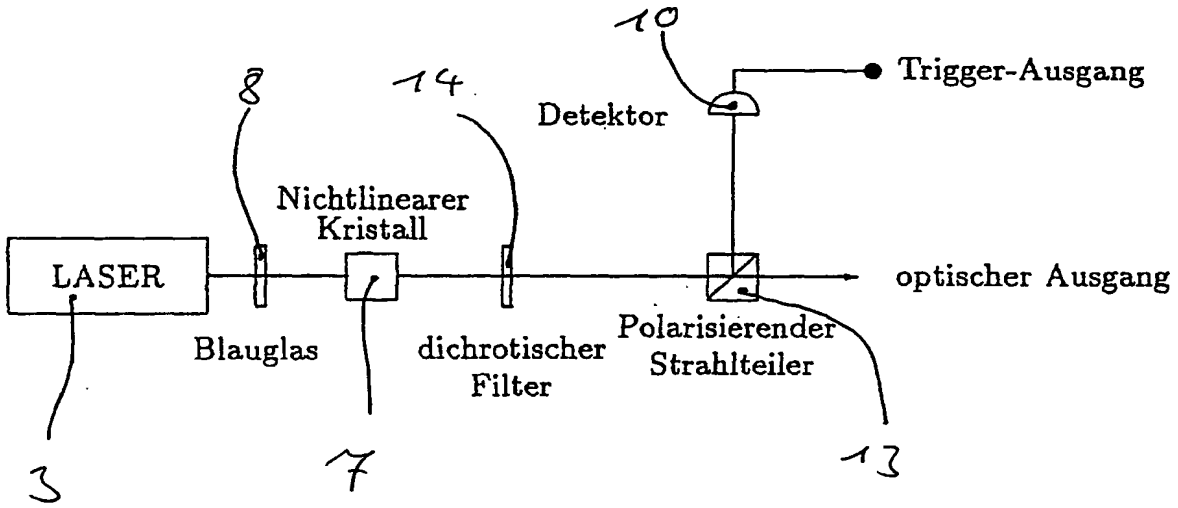
Nummer: DE 196 41 754 A1
Int. Cl.[6]: G 06 E 3/00
Offenlegungstag: 16. April 1998

Fig. 1



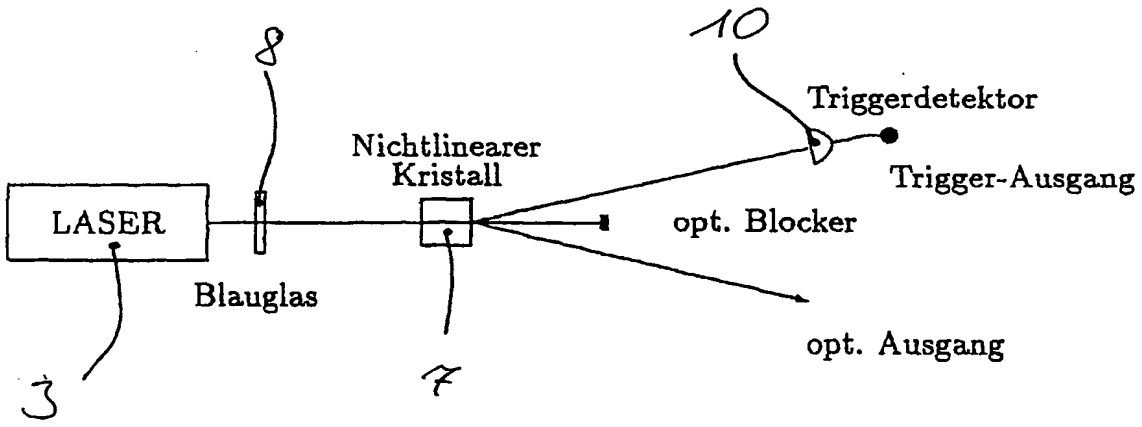
Nummer: DE 196 41 754 A1
Int. Cl.[6]: G 06 E 3/00
Offenlegungstag: 16. April 1998

Fig. 2



Nummer: DE 196 41 754 A1
Int. Cl.[6]: G 06 E 3/00
Offenlegungstag: 16. April 1998

Fig. 3



Nummer: DE 196 41 754 A1
Int. Cl.[6]: G 06 E 3/00
Offenlegungstag: 16. April 1998

Fig. 4